第30卷 第8期
2016年8月

材 料 研 究 学 报
CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH

Vol. 30 No. 8
August 2016

Si-Mn-Cr-B合金钢的高温变形行为及组织演变研究*

毕金凤 李祖来 山 泉 蒋业华 韦 贺 焦 岩

(昆明理工大学材料科学与工程学院 昆明 650093)

摘 要 利用Gleeble-1500D热模拟压缩试验机对Si-Mn-Cr-B合金钢进行高温单道次热压缩试验, 研究了不同应变速率(0.01-5 s^{-1})、不同变形温度(950-1200℃)、50%变形程度条件下的热变形行为, 探索了应变速率和变形温度对应力-应变曲线和微观组织演变的影响, 并在Arrhenius型双曲正弦函数的基础上建立了Si-Mn-Cr-B合金钢的热变形本构方程。结果表明: Si-Mn-Cr-B合金钢高温变形时的峰值应力随应变速率的增大和变形温度的降低而升高, 而高温变形受热激活能过程的控制, 其热变形激活能为Q=372.6 kJ/mol; 材料在变形过程中发生了动态再结晶, 随着温度的升高和应变速率的降低, 动态再结晶晶粒的平均尺寸均呈增大趋势。

关键词 金属材料, Si-Mn-Cr-B合金钢, 热变形, 组织演变, 动态再结晶, 本构方程

分类号 TG142 文章编号 1005-3093(2016)08-0595-08

Investigation on High Temperature Deformation Behavior and Microstructure Evolution of Si-Mn-Cr-B Alloy Steel

BI Jinfeng LI Zulai** SHAN Quan JIANG Yehua WEI He JIAO Yan

(School of Materials Science and Engnineering, Kunming University of Scinece and Technology, Kunming 650093, China)

*Supported by Yunnan Provincal Science and Technology Department No. 619320130010.

Manuscript received December 8, 2015; in received form March 14, 2016.

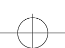
**To whom correspondence should be addressed, Tel: 13888516050, E-mai: lizulai@126.com

ABSTRACT The high-temperature single-pass compression test was carried out by utilizing Gleeble-1500D thermal simulation compression testing machine for Si-Mn-Cr-B alloy steel, while its thermal deformation behavior was studied by different strain rate (0.01-5 s^{-1}) in temperature range 950-1200℃ for the same deformation degree i.e. 50%. The influence of strain rate and temperature on the stress - strain curve and microstructure evolution was explored, and the thermal deformation constitutive equation of Si-Mn-Cr-B alloy steel was established on the basis of Arrhenius hyperbolic sine function. The results show that: the peak stress of the high temperature deformation of the Si-Mn-Cr-B alloy steel increases with the increase of strain rate and the decrease of deformation temperature, but high temperature deformation is controlled by thermal activation energy and its thermal activation energy is Q=372.6 kJ/mol; dynamic recrystallization occurs during deformation, and the average size of the dynamically recrystallized grains all shows a trend of increase with the increase of temperature and the decrease of strain rate.

KEY WORDS metallic materials, Si-Mn-Cr-B alloy steel, thermal deformation, microstructure materials evolution, dynamicrecry stallization, constitutive equations

贝氏体/马氏体复相钢不仅具有较高的硬度, 同时由于其组织含有一定含量的贝氏体组织, 使得材料的韧性也较好。近年来, 贝氏体/马氏体复相钢成为耐磨材料领域的研究和应用热点。Si_2Mn_3系列钢是制备应用于耐磨工况下贝氏体/马氏体复相钢的一种材料, 已得到了较好的研究和应用, 蒋业华等[1]研究表明Si_2Mn_3系列贝氏体/马氏体复相钢的强韧性配合良好, 抗磨料磨损性能优异, 具有很好的综合力学性能[2]。有文献[3]报道硅锰钢履带, 对比了各种附加物对芯砂抗开裂性能的影响, 并进行了浇注试验; 还有利用正火提高硅锰钢铸件的冲击韧性等[4, 5]。综合以上研究, 材料的成型主要利用铸造工艺, 其组织

* 云南省科学技术厅项目619320130010资助。
2015年12月8日收到初稿; 2016年3月14日收到修改稿。
本文联系人: 李祖来, 教授
DOI: 10.11901/1005.3093.2015.714



会存在夹渣、气孔等铸造缺陷, 材料的韧性不高, 导致目前在高冲击耐磨工况下贝氏体/马氏体复相钢没有得到较好的应用。

与铸造成型工艺不同, 锻压工艺具备了可使材料的组织致密、韧性提高等优势[6], 但Si_2Mn_3钢的可锻性成为关键, 欲将锻压工艺应用于Si_2Mn_3钢的成型, 其高温变形行为和组织演变等研究迫在眉睫, 而截至目前本方面的研究鲜有报道[7]。

本论文针对以上问题, 结合高冲击耐磨工况, 在传统Si_2Mn_3材料的基础上, 对材料的设计进行优化, 添加了一定量的Cr、B等合金元素, 获得了一种Si-Mn-Cr-B合金, 并利用热模拟压缩试验机对该Si-Mn-Cr-B合金进行高温单道次热压缩试验, 研究了不同应变速率(0.01-5 s^{-1})、不同变形温度(950-1200℃)、50%变形量条件下的热变形行为, 成功建立了本构方程, 并研究了应变速率和变形温度对应力-应变曲线和微观组织演变的影响。本文可为该合金的热加工工艺的制定提供理论依据, 并为Si_2Mn_3系列贝氏体/马氏体复相钢在高冲击耐磨工况下的应用提供指导。

1 实验方法

利用中频感应电炉熔炼Si-Mn-Cr-B合金, 其成分见表1。熔炼完毕, 浇注成基尔试块, 然后加工成尺寸为ϕ8 mm×12 mm圆柱体, 用于热变形(热压缩)测试。

热压缩试验在Gleeble-1500D热模拟试验机上进行, 具体工艺为: 将试样以10℃/s的速率加热到预定温度前50℃时, 加热速率变为2℃/s, 加热到预定温度(950、1000、1050、1100、1150和1200℃)后保温5 min, 以消除试样内部的温度梯度, 使试样温度均匀化。然后保持变形温度不变, 以恒定的应变速率进行压缩试验。热模拟实验方案为: 变形量为50%, 变形速率0.01、0.1、0.5、1和5 s^{-1}, 变形温度为950、1000、1050、1100、1150和1200℃, 压缩完毕后瞬间喷水快速冷却试样。整个实验过程是在真空环境下完成的, 以防止高温下试样被氧化。

采用线切割方法将压缩后的试样沿轴线剖开, 制备金相试样, 利用光学显微镜观察其纵剖面的显微组织, 腐蚀剂为饱和苦味酸+纯净水+洗涤剂(配比4:2:1, 质量比)+1到2滴盐酸, 腐蚀时间40-50 s。

2 结果与讨论

2.1 真应力-真应变曲线

Si-Mn-Cr-B合金钢热压缩变形时在不同应变速率和不同温度条件下的真应力-真应变曲线如图1所示。从图1中可以看出: 流变应力主要与应变速率、变形温度及应变量有关。在变形初始阶段, 流变应力因加工硬化作用随着应变的增大而递增, 当达到峰值后又因动态回复与再结晶软化作用大于加工硬化作用而逐渐降低, 最终趋于稳定值, 表现为稳态流变特征[8, 10]。在相同的应变速率条件下, 随着温度的升高, 流变应力逐渐下降, 如试样在应变速率0.01 s^{-1}时, 当变形温度从950℃升高到1200℃, 流变应力从100 MPa降低到40 MPa。这是因为随温度的升高, 热变形激活能作用增强, 原子的动能增大, 滑移系的临界切应力下降, 因此, 流变应力下降。

Si-Mn-Cr-B合金钢的真应力-真应变曲线分两类, 一类是动态回复型: 当加工硬化与动态回复基本达到平衡时, 流变应力也基本不再上升, 应力趋于稳定, 另一类是动态再结晶型: 应力在达到峰值应力后下降至稳态值且保持不变, 同时在变化过程中, 峰值应力随应变速率的增大和变形温度的降低而升高。同时有研究表明, 当变形程度足够时, 动态回复型曲线在达到峰值应力前已经发生了再结晶[11, 12]。

在图1a-d中, 即应变速率从0.01-1 s^{-1}的低应变速率下, 对应的不同变形温度下的真应力-真应变曲线变为动态再结晶型, 即应力随应变的增加, 流变应力急剧增加, 直至达到峰值后又随应变下降, 最后达到稳定态的应力值。如应变速率为0.01 s^{-1}, 温度为950℃时, 应力随着应变的增大急剧增加, 达到峰值97.174 MPa又随应变下降到76.213 MPa后趋于稳定, 其他温度下的流变应力曲线也具有相同的趋势。由此可知, 在峰值之前, 加工硬化占据主导作用, 只发生了部分动态再结晶, 硬化作用大于软化作用, 当应力达到极大值后, 随着再结晶的加快, 软化作用大于硬化作用, 使得曲线下降, 当变形造成的硬化与再结晶造成的软化达到动态平衡时, 曲线达到稳定态。

图1e中, 即应变速率为5 s^{-1}的高应变速率下, 对

表1 中碳低合金钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of low alloy medium carbon steel (%, mass fraction)

Elements	C	Si	Mn	Cr	B	Fe
Content	0.4	2.0	2.5	0.5~0.75	0.005~0.0075	Bal.

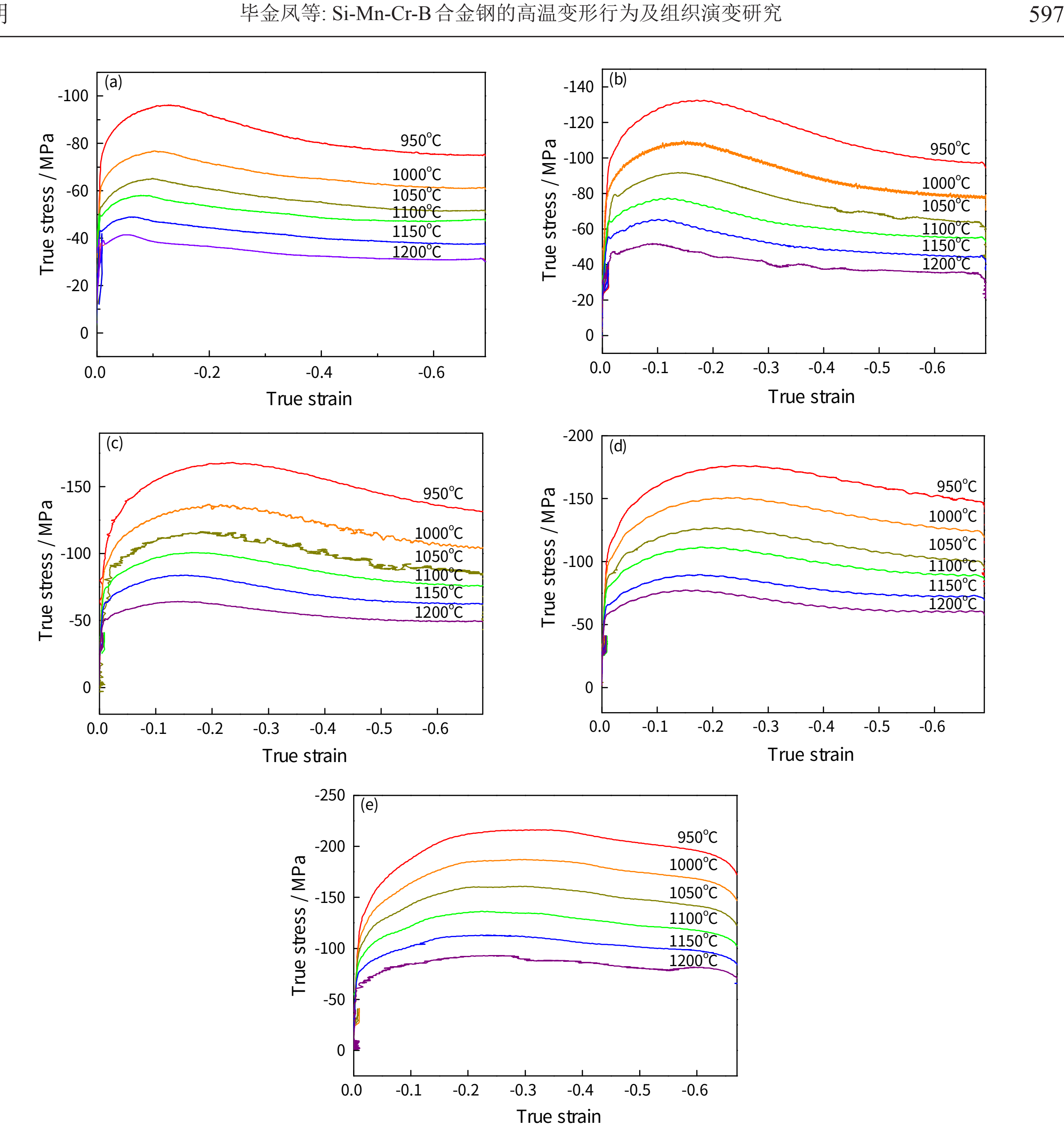


图 1 Si-Mn-Cr-B 合金钢在不同应变速率和不同温度下的真应力-真应变曲线

Fig.1 The true stress-true strain curve of Si-Mn-Cr-B alloy steel under different strain rate and temperature (a) 0.01 s^{-1}; (b) 0.1 s^{-1}; (c) 0.5 s^{-1}; (d) 1 s^{-1}; (e) 5 s^{-1}

应的不同变形温度下的真应力-真应变曲线变为动态回复型, 即变形开始时, 应力先随应变而增大, 但相对于动态再结晶型, 其增加率越来越小, 相继开始均匀的塑性变形, 并伴随着加工硬化的发生, 最后曲线转为水平, 加工硬化率为零, 达到稳定态。如图1e中, 温度为1000℃时, 应力先随应变增加到191.08 MPa, 这一过程的增加率也是在逐渐减小, 最后转为水平, 同样其他温度下的流变应力曲线也具有相同的趋势。

2.2 热成形本构方程的建立

高温流变应力、应变速率和温度之间的关系可用包含激活能 Q 和温度 T 的双曲正弦修正的 Arrhenius 方程表示[13-18]:

低应力水平时 $Y_{\alpha\sigma} < 0.8Y$

$$\varepsilon = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-\frac{Q}{RT}) \tag{1}$$

高应力水平 $Y_{\alpha\sigma} > 1.2Y$

$$\varepsilon = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-\frac{Q}{RT}) \tag{2}$$

对于所有应力

$$\varepsilon = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-\frac{Q}{RT}) \tag{3}$$

式中 A_1、A_2、A、β 均为与温度无关的常数; n_1、n 为应力指数; ε 为应变速率(s^{-1}); σ 为峰值应力(MPa); R 为

气体常数(kJ/mol·K); Q为变形激活能(kJ/mol), $\sigma=\beta/n_1$。

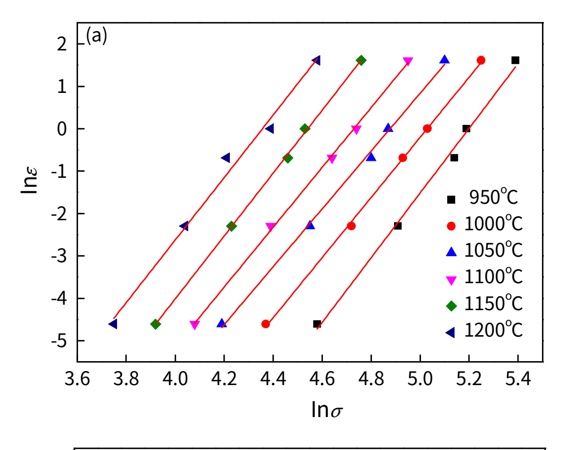
对(1)、(2)、(3)式两边分别取自然对数, 并假设热激活能Q与温度T无关, 整理可得:

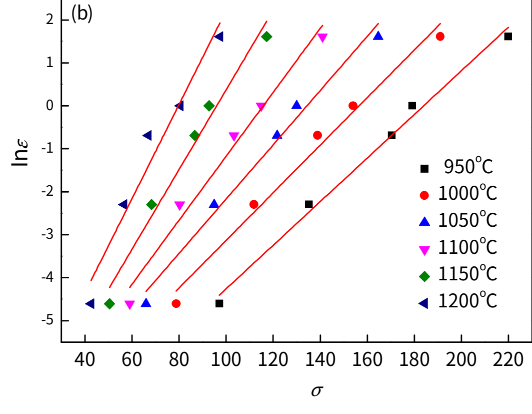
$$\ln\varepsilon=\ln A_1+n_1\ln\sigma-Q/RT \tag{4}$$

$$\ln\varepsilon=\ln A_2+\beta\sigma-Q/RT \tag{5}$$

$$\ln\varepsilon=\ln A+n\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-Q/RT \tag{6}$$

依据(4)、(5), 分别以$\ln\varepsilon$-$\ln\sigma$和$\ln\varepsilon$-σ为坐标作图, 其斜率分别近似表示为n_1、β。从图2中, $\ln\varepsilon$-$\ln\sigma$关系图和$\ln\varepsilon$-σ关系图的数据拟合结果, 可以得到n_1=7.23 和β=0.074, $\alpha=\beta/n_1$=0.01/MPa。将峰值应力和所求的α值代入式(6)中进行线性回归分析得到图2c。





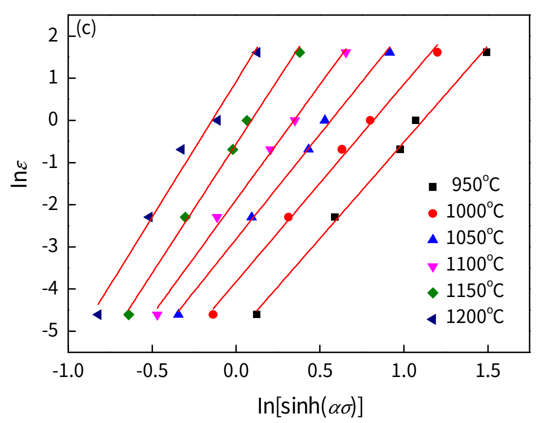


图2 峰值应力与应变速率的关系曲线

Fig.2 The relation curve of peak stress and strain rate

在材料热变形过程中, Zener 和 Hollomon[19]指出, 变形温度(T)和应变速率(ε)对流变应力的影响可归结为复合因子的影响, 即Z参数。因此, 将采用Z参数来综合分析应变速率、变形温度对Si-Mn-Cr-B合金钢的高温变形流变应力的影响。Zener-Hollomon参数表示为[20]:

$$Z=\varepsilon\exp(\frac{Q}{RT}) \tag{7}$$

式中Z参数的物理意义为温度补偿的应变速率因子[21], Q为变形激活能。结合式(3), Z参数的表达式表述为:

$$Z=\varepsilon\exp(\frac{Q}{RT})=A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{8}$$

在恒应变速率下, 假定一定温度范围内Q值不变, 根据式(8)得:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]=A'+B'\frac{1000}{T} \tag{9}$$

式中A'、B'为与温度无关的常数。

将不同变形条件下的流变应力峰值代入式(9)进行计算, 即可绘制出$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$-$1000/T$的关系曲线图, 如图3所示。从图3可知, 变形温度与流变应力之间呈较好的线性关系, 这也证明了中碳低合金钢在高温变形时流变应力与变形温度之间满足双曲正弦函数关系式。

计算变形激活能, 对式(6)两边取偏微分得:

$$Q=R\left\{\frac{\partial\ln\varepsilon}{\partial[\sinh(\alpha\sigma)]}\right\}_T\left\{\frac{\partial[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)}\right\}_\varepsilon$$

$$n=\left\{\frac{\partial\ln\varepsilon}{\partial[\sinh(\alpha\sigma)]}\right\}_T$$

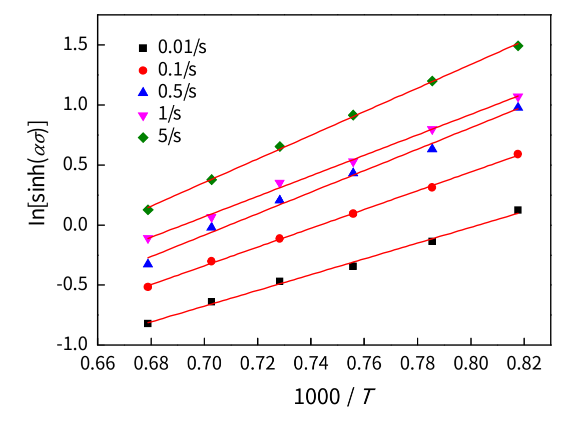


图3 不同应变速率条件下硅锰钢$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$关系

Fig.3 The $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-1/T$ relation curve of silico-mangan steel under different strain rate

$$n' = \left\{ \frac{\partial[\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial(1/T)} \right\}_{\varepsilon}$$

$$Q = Rnn' \tag{10}$$

式中, n 和 n' 分别为图2和图3的斜率, 取图2中各直线斜率平均值, 得 n =5.374, 取图3中各直线斜率的平均值, 得 n' =8.344, 将 n 、n' 和R代入式(10), 得到变形激活 Q=372.6 kJ/mol。

由式(6)及图3可知, 直线的截距 L 即为 $\ln A$-Q/RT 的值, 将 L、Q、R、T 的值代入 L=$\ln A$-Q/RT 即可求得不同温度下的 A 值, 取其平均值, 得 A=3.5×10^{13}/s。

将得到的 Q、n、α、A 等参数代入式(1)可得到Si-Mn-Cr-B 合金钢高温流变峰值流变应力本构方程为:

$$\varepsilon = 3.5\times10^{13}[\sinh(0.01\sigma)]^{5.374}\times\exp(\frac{-372600}{RT}) \tag{11}$$

根据双曲正弦函数的定义, 可以将流变峰值应力 σ 表述为Zener-Hollomon参数 Z 的函数:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha}\ln\{(\frac{Z}{A})^{\frac{1}{n}} + [(\frac{Z}{A})^{\frac{2}{n}} + 1]^{\frac{1}{2}}\} \tag{12}$$

将 a 和 n 代入式(12)可得包含 Arrhenius 项的 Z 参数来描述的流变应力 σ、应变速率 ε 和温度 T 之间的本构关系式:

$$\sigma = \frac{1}{0.01}\ln\{(\frac{Z}{3.5\times10^{13}})^{\frac{1}{5.374}} + [(\frac{Z}{3.5\times10^{13}})^{\frac{2}{5.374}} + 1]^{\frac{1}{2}}\} \tag{13}$$

为了验证上述本构方程的精确度, 将不同应变速率和不同变形温度下的真应力-真应变曲线的预测值和实验值进行比较, 图4是根据式(13)计算得到的流变峰值应力值与实验测得流变应力峰值比较图。从图中可以清楚地看, 实验测得的峰值应力与根据流变应力本构模型计算出来的峰值应力基本吻合。因此, 本构方程具有较高的精确度, 可为 Si-Mn-Cr-B 合金钢热加工工艺的制定提供理论依据。

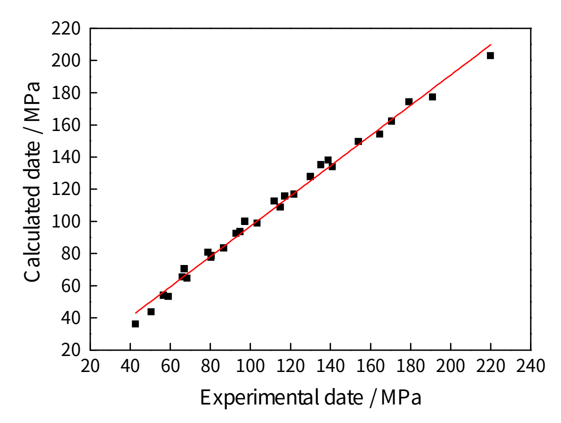


图4 理论计算流变应力与实测峰值比较

Fig.4 The comparison between theoretical calculation flow stress and measured peak value

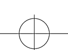
2.3 显微组织演变

2.3.1 温度对显微组织的影响　在一定的应变速率下, 随着变形温度的升高, 其显微组织的形貌也不同。图5为应变速率为5 s^{-1}, 压缩量为50%, 温度分别为950℃、1000℃、1050℃、1100℃、1150℃、1200℃时压缩试样的显微组织。

从图5中可以看出, 实验钢的晶粒尺寸随着温度的升高而增大。在变形过程中, 随着温度的升高, 大晶粒逐渐取代小晶粒, 组织趋于稳定, 在稳定阶段显微组织形态以再结晶的等轴晶为主, 晶粒大小均匀, 但是在晶粒内部包含着被位错缠结所分割的亚晶粒, 说明其内部在发生动态再结晶的同时也伴随有动态回复的发生; 另外, 动态再结晶时由于一边发生形变一边发生变形, 所以晶界的迁移速度也较慢。当温度为1150℃时, 晶粒尺寸达到了最大, 到1200℃时晶粒尺寸较1150℃时几乎没有变化。这是因为原子活性随着温度的升高而增加, 此时材料的软化作用明显, 同时受热激活能作用的影响, 增大了驱动力, 促使晶粒开始迅速长大, 到1150℃时变形已经彻底, 随着温度的继续增加, 则晶粒尺寸不再继续长大。

2.3.2 应变速率对显微组织的影响　在一定变形温度下, 随着应变速率的升高, 其显微组织的形貌也不同。图6为变形温度为1100℃, 压缩量为50%, 应变速率为0.1、0.5、1、5 s^{-1}时压缩试样的显微组织。

从图6中可以看出, 实验钢的晶粒尺寸随着应变速率的增大而减小。应变速率为0.1s^{-1}时晶粒相对粗大, 随着应变速率的逐渐增大, 晶粒开始细化, 应变速率从0.1 s^{-1}到1 s^{-1}晶粒细化明显, 大小均匀, 晶粒随着应变速率的增大迅速减小; 应变速率为5 s^{-1}时, 晶粒更加细小均匀, 但和应变速率为1 s^{-1}时相比, 晶粒尺寸减小的程度减小。由此可以得出, 试样在高的应变速率条件下, 晶粒细化比较明显, 随着应变速率的增大晶粒细化程度慢慢趋于稳定。这是因为变形温度一定时, 空位原子扩散加剧, 位错攀移和交滑移不断增加, 促使晶界迁移和位错运动的驱动力增加, 因此再结晶就越容易发生, 而变形速率越慢, 即变形时间越长, 再结晶行为越彻底。



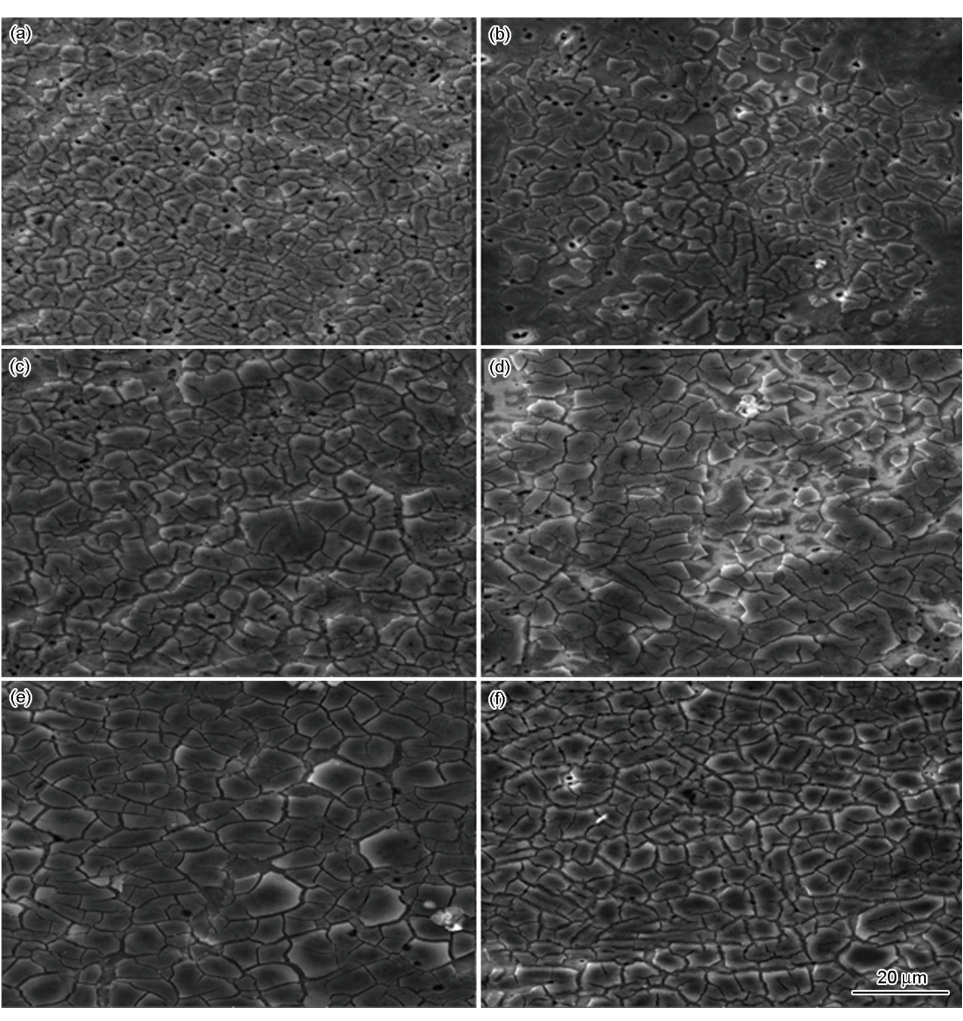


图 5 应变速率为 5 s^{-1}时不同温度下硅锰钢的显微组织

Fig.5 The microscopic structure of silico-mangan steel at different temperature when ε=5 s^{-1}. (a) 950℃; (b) 1000℃; (c) 1050℃; (d) 1100℃; (e) 1150℃; (f) 1200℃

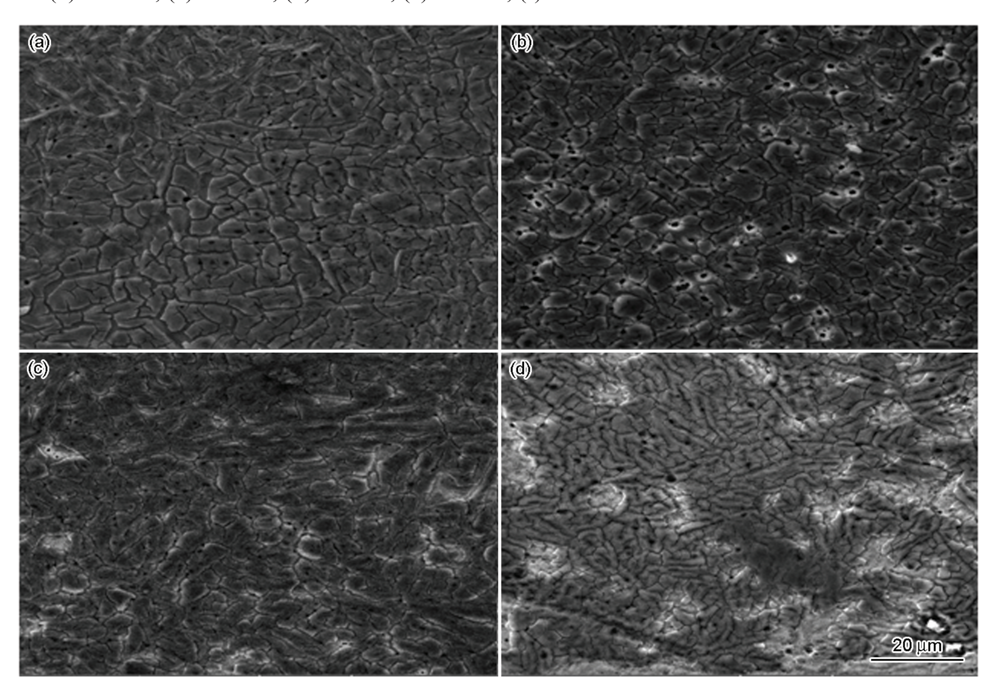
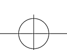


图 6 1100℃时不同应变速率下硅锰钢的显微组织

Fig.6 The microscopic structure of silico-mangan steel in different strain rate at 1100℃ (a) 0.1 s^{-1}; (b) 0.5 s^{-1}; (c) 1 s^{-1}; (d) 5 s^{-1}



3 结　论

1. 随着变形温度的降低、应变速率的增大, Si-Mn-Cr-B 合金钢热变形中的流变应力和峰值应力均呈增大趋势。

2. Si-Mn-Cr-B 合金钢高温变形受热激活能过程的控制, 热变形激活能 Q=372.6 kJ/mol, 峰值流变应力本构方程为:

$$\varepsilon = 3.5\times10^{13}[\sinh(0.01\sigma)]^{5.374}\times\exp(\frac{-372600}{RT})$$ 。

3. Si-Mn-Cr-B 合金钢在高温变形过程中发生了动态再结晶, 当变形温度不变时, 低的应变速率有利于发生动态再结晶, 而应变速率不变时, 温度的升高有利于发生动态再结晶。动态再结晶晶粒的平均尺寸随着温度的升高、应变速率的降低而增大。

参 考 文 献

1 JIANG Yehua, The effect of controlled cooling anti-wear diphase bainitic cast iron grinding ball and cast steel plate, PhD thesis (Kunming, Kunming University of Scinece and Technology, 2000)
(蒋业华, 控制冷却贝氏体复相耐磨铸铁磨球和铸钢衬板的研究, 博士学位论文(昆明, 昆明理工大学, 2000))

2 LI Wei, Production and market of wear resistant irons and steels parts, Foundry, **53**(12), 958(2004)
(李　卫, 耐磨钢铁件的市场与生产, 铸造, **53**(12), 958(2004))

3 JIA Liuka, CHEN Liezhang, LI Jianguo, ZHU Jianxun, Eliminating veining defect in pin holes of Si-Mn steel crawler plate, Foundry Technology, (1), 11(1995)
(贾刘卡, 陈烈章, 李建国, 祝建勋, 消除硅锰钢履带板销孔毛刺的试验研究, 铸造技术, (1), 11(1995))

4 REN Yongqiang, SHANG Chengjia, ZHANG Hongwei, YUAN Shengfu, CHEN Erhu, Effect of retained austenite on toughness and plasticity of 0.23C-1.9Mn-1.6Si steel, Chinese Journal of Materials Research, **28**(4), 274(2014)
(任勇强, 尚成嘉, 张宏伟, 袁胜福, 陈二虎, 0.23C-1.9Mn-1.6Si 钢中的残余奥氏体对韧塑性的影响, 材料研究学报, **28**(4), 274(2014))

5 CAI Minghui, DING Hua, ZHANG Jiansu, LI Long, TANG Zhengyou, Deformation and fracture characteristics of ferrite/bainite dual-Phase steels, Chinese Journal of Materials Research, **23**(1), 274(2009)
(蔡明晖, 丁　桦, 张建苏, 李　龙, 唐正友, 铁素体/贝氏体双相钢的变形和断裂特性, 材料研究学报, **23**(1), 274(2009))

6 WUYuanzhi, YAN Hongge, ZHU Suqin, CHEN Jihua, LIU Anmin, LIU Xianlan, Microstructure evolution and mechanical of Mg-Zn-Zr alloys during high strain rate triaxial-forging, Chinese Journal of Materials Research, **28**(2), 144(2014)
(吴远志, 严红革, 朱素琴, 陈吉华, 刘安民, 刘先兰, Mg-Zn-Zr 合金高应变速率多向锻造组织演变及力学性能, 材料研究学报, **28**(2), 144(2014))

7 WANG Meng, WANG Zhong, SUN Shichao, FENG Xianlei, XIE Lingzhen, Hot compressive deformation behavior of 06Cr25Ni20 stainless steel, Transactions of Materials and Heat Treatment, **35**(12), 222(2014)
(王　孟, 王　忠, 孙世超, 冯显磊, 谢玲珍, 06Cr25Ni20 不锈钢的热压缩变形行为, 材料热处理学报, **35**(12), 222(2014))

8 QIAO Huijuan, LI Fuguo, JI Guoliang, XIAO Meili, Deformation behavior at elevated temperature and processing map of Aermet100 steel, Rare Metal Materials and Engineering, **43**(4), 926(2014)
(乔慧娟, 李付国, 冀国良, 肖美立, Aermet100 钢高温变形行为及热加工图研究, 稀有金属材料与工程, **43**(04), 926(2014))

9 TAN Zhilin, XIANG Song, Behavior of hot deformation and critical strain for dynamic recrystallization of a Q690 low carbon microalloyed steel, Transactions of Materials and Heat Treatment, **34**(05), 42(2013)
(谭智林, 向　嵩, Q690 低碳微合金钢热变形行为及动态再结晶临界应变, 材料热处理学报, **34**(05), 42(2013))

10 SUN Shuli, ZHANG Mingang, HE Wenwu, CHEN Huiju, TIAN Xiangju, Hot deformation mechanism and microstructure evolution of 9%Cr heat resistant steel, Materials Engineering, (12), 19(2010)
(孙述利, 张敏刚, 何文武, 陈慧琴, 田香菊, 9%Cr 耐热钢的高温热变形机制及组织演变, 材料工程, (12), 19(2010))

11 Z. Yang, F. Zhang, C. Zheng, M. Zhang, B. Lv, L. Qu, Study on hot deformation behaviour and processing maps of low carbon bainitic steel, Materials & Design, (66), 258(2014)

12 FU Jia, LI Yongtang, FU Jianhua, SONG Jianli, LEI Bufang, QI Huiping, Dynamic recrystallization behavior of as-cast 42CrMo steel during hot compression deformation, Materials for Mechanical Engineering, **36**(2), 91(2012)
(付　甲, 李永堂, 付建华, 宋建丽, 雷步芳, 齐会萍, 铸态 42CrMo 钢热压缩变形时的动态再结晶行为, 机械工程材料, **36**(2), 91(2012))

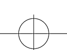
13 XIA Yufeng, ZHAO Lei, YU Chuntang, QUAN Guozheng, ZHOU Jie, Dynamic recrystallization critical conditions of 42CrMo steel, Transactions of Materials and Heat Treatment, **34**(4), 74(2013)
(夏玉峰, 赵　磊, 余春堂, 权国政, 周　杰, 42CrMo 钢动态再结晶的临界条件, 材料热处理学报, **34**(4), 74(2013))

14 C. M. Sellars, W. J. Mctegart, On the mechanism of hot deformation, Acta Metallurgica, **14**(9), 1136(1966)

15 ZHANG Xuemin, CAO Fuyang, YUE Hongyan, FENG Yicheng, GUO Erjun, KANG Fuwei, Establishment of constitutive equations of TC11 alloy during hot deformation, Rare Metal Materials and Engineering, 42(5), 937(2013)
(张雪敏, 曹福洋, 岳红彦, 冯义成, 郭二军, 康福伟, TC11 钛合金热变形本构方程的建立, 稀有金属材料与工程, **42**(5), 937(2013))

16 H. Takuda, H. Fujimoto, N. Hatta, Modelling on flow stress of Mg-Al-Zn alloys at elevated temperatures, Journal of Materials Processing Technology, **80**(98), 513(1998)

17 HUANG Weichao, LU Yalin, JIANG Haitao, LI Miaoquan, Effect of the process parameters on microstructure of the semisolid Al-



4Cu-Mg alloy in the isothermal compression process, Rare Metal Materials and Engineering, **34**(5), 833(2005)
(黄维超, 卢雅琳, 江海涛, 李淼全, 变形条件对半固态 Al-4Cu-Mg 合金微观组织的影响, 稀有金属材料与工程, **34**(5), 833 (2005))

18 C. Zener, J. H. Hollomon, Effect of strain rate upon plastic flow of steel, Journal of Applied Physics, **15**(1), 22(1944)

19 S. F. Medina, C. A. Hernandez, General expression of the Zener-Hollomon parameter as a function of the chemical composition of low alloy and microalloyed steels, Acta Materialia, **44**(1), 137 (1996)

